

# ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ДИНАМИКУ ДИСЛОКАЦИЙ В КРЕМНИИ

Д. ф. м.-н. Скворцов А.А.,  
асп. Корячко М.В.,  
к. ф.-м. н. Волкова Л.В.

*Россия, Москва, Университет машиностроения*

**Abstract.** *In this work measurements of the velocity of dislocations and their delay times on different types of stoppers, as well as the dependence of the maximal distance of dislocations from the exposure time of the samples in a magnetic field. The effect of the magnetic memory of dislocation of silicon and considered his kinetic aspects of in vivo storage of the sample after turning off the magnetic field.*

**Keywords:** *magnetic field, dislocation dynamics, silicon*

Известно, что магнитное поле (МП) с индукцией  $B \sim 1$  Т способно влиять на подвижность линейных дефектов в ионных кристаллах, металлах и полупроводниках [1-8]. Объясняя физику воздействия энергетически слабого магнитного поля на динамику дислокационной структуры, большинство исследователей склоняется к модели спинзависимых реакций [1-12]. Суть этой модели сводится к магнитостимулированной эволюции электронных спинов примесных центров, снимающих спиновый запрет на определенные электронные переходы. Это на изменении скорости перемещения линейных дефектов как в поле внутренних напряжений кристалла, так и в поле внешних сил.

Несмотря на убедительность экспериментальной информации по этой тематике, практически не изучена подвижность дислокационных сегментов в элементарных полупроводниках при различных временах выдержки образцов в МП. Отсутствуют сведения о полевых зависимостях дислокационных пробегов в элементарных полупроводниках, подвергнутых выдержке в магнитном поле. Практически отсутствует также информация по разграничению роли различных типов стопоров, взаимодействующих с движущейся дислокацией в легированном полупроводнике. Анализу этих вопросов и посвящена представленная работа.

В качестве объекта исследования выступали легированные бором и фосфором ( $0.5-5 \Omega \cdot \text{cm}$ ) пластинки монокристаллического кремния, параметры которых сведены в таблицу 1. Ввод дислокаций осуществлялся нанесением царапин (рис.1) в определенном кристаллографическом направлении по технологии [13,14]. На каждый образец наносилось не более двух параллельных царапин, расстояние между которыми значительно превышало максимальный пробег дислокационных полупетель. Подготовленные таким образом образцы подвергались обработке магнитным полем ( $B \leq 1$  Т), вектор магнитной индукции которого был всегда перпендикулярен нанесенным царапинам. Время обработки в МП  $t_B$  варьировалось в диапазоне 30- 1800 с, при фиксированном временном интервале (180 с) между окончанием магнитной обработки и началом высокотемпературной пластической деформации.

Движение поверхностных дислокационных петель осуществлялось 40 минутными растягивающими напряжениями до 50 МПа, реализуемым изгибом пластин по 4-х точечной схеме. Пробег дислокаций регистрировался методом избирательного травления. При построении зависимостей информация снималась с 15 различных участков рассматриваемой трещины.

Вектор магнитной индукции МП был всегда перпендикулярен нанесенным царапинам (рис.1). Время экспозиции  $t_B$  в магнитном поле варьировалось в диапазоне 30-2800 с при фиксированном временном интервале  $t^*=180$  с между окончанием магнитной обработки и началом высокотемпературной пластической деформации. Фиксация  $t^*$  продиктована релаксационными процессами магниточувствительных стопоров после магнитной обработки кремниевых образцов. Как было показано выше (раздел 5.3.3), на первом этапе исследований проводились наблюдения за дислокациями в Si, обработанном МП. Было установлено, что заметного перемещения дефектов в отсутствии отжига не происходит. Лишь высокотемпературная обработка активизирует дислокации. Причем предварительная экспозиция образцов в магнитном поле способствует более быстрому их перемещению в кристалле.

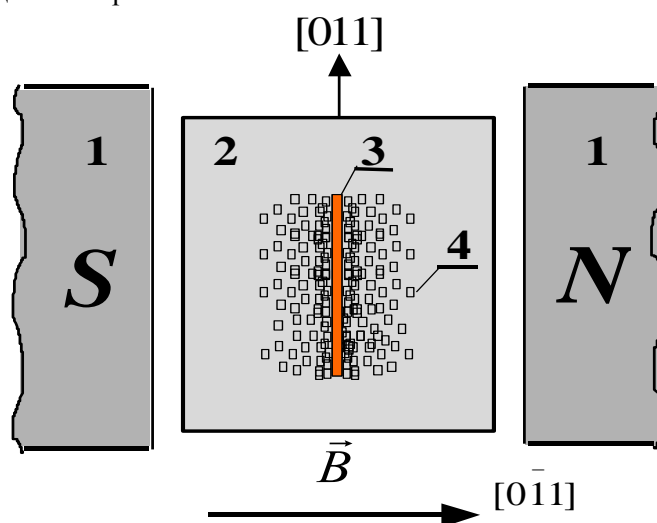


Рис.1. Схема расположения пластины кремния р-типа, ориентированной в направлении  $[100]$ , с царапиной между полюсами магнита: 1 – полюса электромагнита; 2 – пластина кремния; 3 – концентратор напряжений (царапина); 4 – ямки травления поверхностных дислокаций (дислокационных сегментов), появляющиеся после изотермического отжига.

Пусть движение дислокаций в поле внешних и внутренних сил определяется тремя основными видами стопоров, связанными с собственным барьером кристаллической решетки (подстрочный индекс  $i = 1$ ), основной легирующей примесью ( $i = 2$ ) и пересекающимися линейными дефектами, включая дислокации леса ( $i = 3$ ).

Проведенные исследования зафиксировали возрастание скоростей перемещения фронтальных дислокаций с увеличением индуктивности магнитного поля. Подобная картина наблюдается при любых исследуемых  $B$  как для  $n$ -, так и  $p$ -Si (рис.2). Динамика дислокационных сегментов в этом случае определяется магниточувствительными стопорами на базе легирующей примеси. Однако темп изменения  $V=f(B)$  не постоянен. Наибольшие изменения скоростей перемещения дислокаций наблюдаются при малых  $B$ , в то время как при больших  $B$  он резко снижается, проявляя отчетливую тенденцию к насыщению.

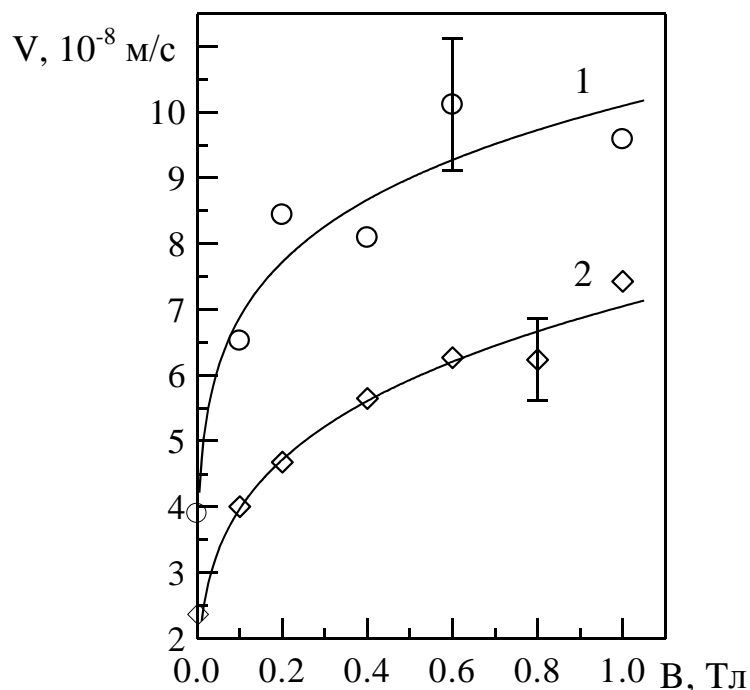


Рис.2. Полевые зависимости скоростей перемещения фронтальных дислокаций:  
 $P=0.84$  H;  $T=950$  K.

Полученная выше количественная информация касалась лишь изолированных дислокаций, достаточно далеко удаленных от травмированных областей кристалла. Между тем участки Si с большими значениями  $N_d$ , т.е. доминирующим влиянием "дислокационных" стопоров  $C_3$ , также несут в себе важную информацию, извлечение которой может базироваться на согласовании экспериментальных (рис..3) и аналитических значений  $V_3$ .

$$V_3 = \frac{1}{C_3 \tau_3} = \frac{1}{\tau_3 \gamma \sqrt{N_d} \cos \alpha \cos \beta}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  –число плоскостей скольжения;  $\alpha$  и  $\beta$  –углы между плоскостями скольжения и векторами Бюргерса взаимодействующих дислокаций соответственно. Очевидно, что парциальная скорость перемещения дислокаций  $V_3$  при малых значениях  $C_3 \tau_3$  будет неограниченно возрастать, уступая контроль другому типу стопоров.

Действительно, скорость движения дислокаций в пространственных зонах, контролируемых рассматриваемым видом стопоров (рис.3), хорошо согласуется с (1) при всех исследуемых температурных режимах. Это позволяет определить как средние времена закрепления дислокаций на соответствующих стопорах  $\tau_3$ , так и величину энергетического барьера при их преодолении  $E_a$ .

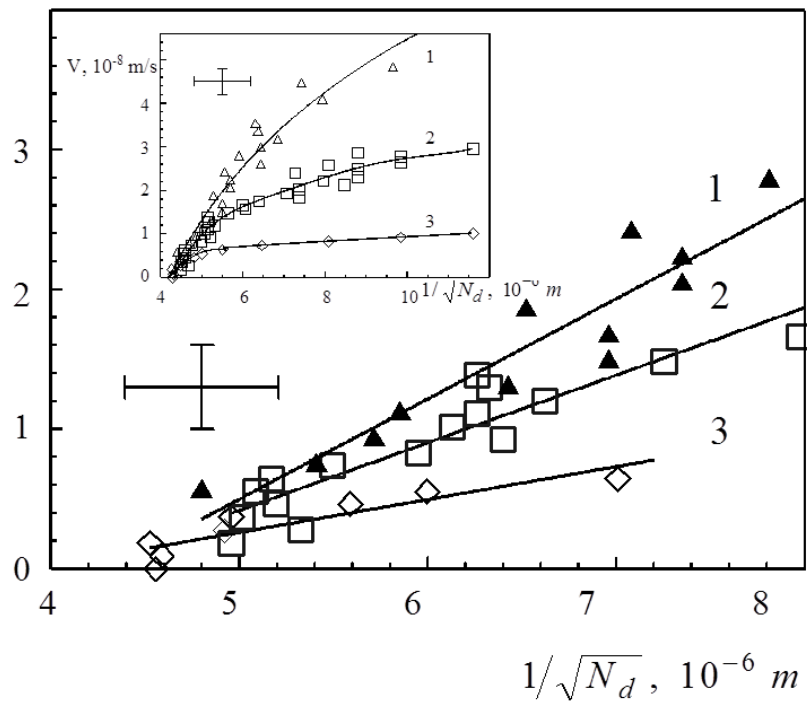
$V, 10^{-8} \text{ m/s}$ 


Рис.3. Зависимость скорости движения дислокаций в пространственных зонах, контролируемых  $C_3$  (сплошные линии), от  $1/\sqrt{N_d}$ , определяющего расстояние между дислокациями:  $n\text{-Si}$  ( $0.01 \text{ Ом см}$ );  $\sigma_{ext} = 74 \text{ МПа}$ ;  $P=0.84 \text{ Н}$ . 1 – 900 К; 2 – 870 К; 3 – 820 К. На вставке представлена полная зависимость  $V=f(N_d)$ .

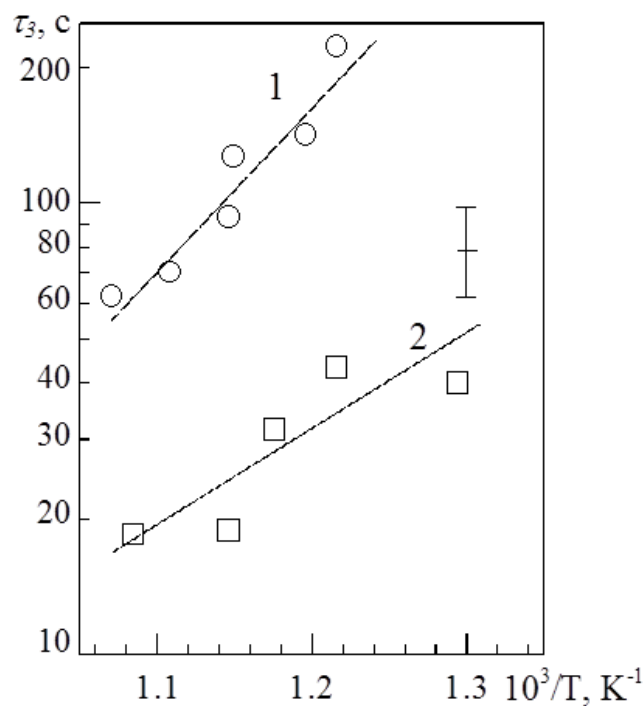


Рис.4. Изменение времен закрепления дислокаций на третьем типе стопоров с температурой отжига.  $n\text{-Si}$  ( $0.01 \text{ Ом см}$ ),  $\sigma_{ext} = 74 \text{ МПа}$ ,  $P=0.84 \text{ Н}$ . 1 –  $B=0$ ; 2 –  $B=1 \text{ Тл}$ ,  $t_B = 20 \text{ мин}$ .

Как видно из рис.4, времена закрепления дислокаций на третьем типе стопоров уменьшаются после магнитной обработки кристалла. Причину этого следует искать в том, что МП влияет на частоту синглетно-триплетных переходов в радикальных парах, принадлежащих точечному дефекту и дислокации. Включение поля стимулирует переходы пар в менее глубокое триплетное состояние с меньшей энергией связи дислокации со стопором [15]. По-видимому, подобный эффект проявляется и при наложении междислокационного взаимодействия в системе "дислокация-примесный центр-дислокация" и приводит к уменьшению  $\tau_3$  в кристаллах, обработанных МП.

Вычисленные значения энергии активации процесса открепления дислокаций от третьего типа стопоров составляют  $0.78 \pm 0.1$  эВ для необработанных магнитным полем кристаллов и  $0.38 \pm 0.1$  эВ – обработанных.

Таким образом, в работе обнаружено, что предварительная выдержка монокристаллов кремния приводит к последующей активизации подвижности дислокаций. Зафиксирована зависимость дислокационных пробегов от величины индукции магнитного поля, а также магнитостимулированное изменение времен закрепления дислокаций на стопорах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №13-07-00514.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Перекалина Т.М. и др. О движении дислокаций в кристаллах NaCl под действием постоянного магнитного поля. // ФТТ. 1987. Т. 29. вып. 2. С.467-471.
2. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Жуликов С.Е. Влияние постоянного магнитного поля на преодоление дислокациями короткодействующих препятствий в монокристаллах LiF. // ФТТ. 1997. Т. 39. вып. 3. С.495-496.
3. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Жуликов С.Е. Влияние постоянного магнитного поля на преодоление дислокациями короткодействующих препятствий в монокристаллах LiF. // ФТТ. 1997. Т. 39. вып. 3. С.495-496.
4. Дацко О.И., Алексеенко В.И. Внутреннее трение в магнитообработанном материале с дислокациями. // ФТТ. 1997. Т. 39. вып. 7. С.1234-1236.
5. Боярская Ю.С., Грабко Д.З., Мединская М.И. и др. Механические свойства чистых и легированных InP, выявленные при локальном нагружении. // ФТП. 1997. Т. 31. №2. С.179-182.
6. В.А. Макара, Л.П. Стебленко, В.В. Обуховский и др. О влиянии постоянного магнитного поля на электропластический эффект в кристаллах кремния. // ФТТ. 2000. Т.42. №5. С.854-858.
7. Даринская Е.В., Петржик Е.А. Ерофеева С.А. и др. Магнитопластический эффект в InSb. // Письма в ЖЭТФ. 1999. Т. 70. вып. 4. С.298-302.
8. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Петржик Е.А. Магнитопластический эффект в монокристаллах алюминия. //ФТТ. 1992. Т.24. №1. С.155-158.
9. Молоцкий М.И. Возможный механизм магниопластического эффекта. // ФТТ. 1991. Т. 33. вып. 10. С.3112- 3115.
10. В.И.Альшиц, Е.В.Даринская, Е.А.Петржик. "In situ" изучение магнитопластического эффекта в кристаллах NaCl методом непрерывного травления.// ФТТ. Том 33. Вып.10. С.3001-3010.
11. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Иванов В.Е. In situ исследование влияния магнитного поля на подвижность дислокаций в деформируемых монокристаллах KCl:Ca. // ФТТ. 1997. Т. 39. вып. 4. С.630-633.
12. Molotskii M.I., Kris R.E., Fleurov V. Internal friction of dislocations in a magnetic fields. // Phys. Rev. B. 1995. Vol. 51. № 18. P.12531-12536.
13. Сковрцов А.А., А.М. Орлов, В.А. Фролов и др. Влияние магнитного поля на акустическую эмиссию в дислокационном кремнии при токовых воздействиях. //ФТТ. 2000. Т.42. №10. С.1814-1817.
14. Сковрцов А.А., Орлов А.М., Гончар Л.И. Влияние слабого магнитного поля на подвижность дислокаций в кремнии. //ЖЭТФ. 2001. Т.120. Вып.1(7). С.134-138.
15. Моргунов Р.Б. Спиновая микромеханика в физике пластичности. УФН, 2004, Т 174, № 2, С. 131–153